

有限開口レンズにより絞られたレーザビームの界の測定

羽 伐 浩 二*・岩 崎 昌 平*

佐 賀 信 裕*・田 中 和 雅*

Measurement of Focused Laser Beam by a Finite Aperture Lens

by

Koji HAUCHI*・Shohei IWASAKI*

Nobuhiro SAGA*・and Kazumasa TANAKA*

The field distributions of focused beam through a finite aperture lens varies depending upon its incidence conditions and aperture dimension. When the aperture radius of the lens is not large enough compared with the spot size of the incident laser beam, the most focused point cannot be determined uniquely. Two of the most simple definitions of this focused point are, 1) the point where the axial intensity is maximum and 2) the point where the spread of the field is smallest. These points are easily obtained theoretically or numerically. The focused points are measured and compared with them obtained from above definitions. The results show that the point defined by the point of maximum axial intensity coincide with theoretical calculations, while the point of the minimum field spread has some deviation from theoretical one.

1. まえがき

コヒーレントなレーザ光は十分大きな開口をもったレンズを用いれば微小な領域内にそのエネルギーを集中させることができる。このビームが最も絞られた位置（これを本論文では焦点と呼ぶことにする）はビームを絞るために用いたレンズの焦点の位置とは異なりビームの入射条件、レンズの焦点距離によって変化するが、簡単なビームパラメータの変換公式により求められる。¹⁾しかしレンズの開口が有限な場合、その焦点の位置を定義することは必ずしも簡単ではない。

無限開口レンズの場合は焦点の位置がビームの伝搬軸上輝度は最大であり、かつそこで伝搬軸に垂直な方向（横方向）の界分布の広がり（これはビームのスポットサイズで決まる）が最小となっている。このため焦点の位置は一義的に決められるが、有限開口レン

ズの場合、伝搬軸上強度最大の点と横軸分布最小の位置がずれてくる。^{2),3),4)}したがってこの場合、回折界の焦点をどのように定義するかが難しくなってくるが、実用上からはある有限な受光面積内に入射するエネルギーが最大となる位置を知ることが大切と思われる。⁵⁾本論文では焦点の定義として伝搬軸上の界強度が最大の位置とした場合と、回折界の広がり最小としたときの二つの定義を用いた場合の焦点の位置の違いを数値的に求め、それを実験と比較検討した。

2. 有限開口レンズによる回折界

入射波として $Z=Z_s$ に最小スポットサイズ w_s をもつ次のようなビーム波を考える。

$$\psi(\rho, Z) = \frac{\kappa}{\sqrt{\pi}} \exp \left\{ -ik(Z-Z_s) - \frac{1}{2} \kappa^2 \sigma^2 \rho^2 \right\}$$

昭和59年4月28日受理

*電子工学科 (Department of Electronics)

$$+i \tan^{-1} \xi \}, \quad (1)$$

ここで

$$\xi = \frac{2(Z-Z_s)}{kws^2}, \quad \kappa = \frac{\sqrt{2}}{ws\sqrt{1+\xi^2}}, \quad (2)$$

$$\sigma^2 = 1 + i\xi$$

である。いまこのビーム波が $Z=0$ にある半径 a の有限開口をもつ焦点距離 f のレンズに入射したとする。このとき近傍界をのぞく任意の点での回折界はハイゲンス・キルヒホフの回折公式より求められる。これより任意の点 (ρ, Z) での界輝度は、開口での入射波の中心軸輝度を I_0 とすれば、

$$\frac{I(\rho, Z)}{I_0} = \frac{P^2 a^4}{F^2} \left[\left\{ \int_0^1 x J_0 \left(\frac{aPR}{F} x \right) \exp \left(-\frac{a^2 x^2}{1+\xi_0^2} \right) \sin(s_1 x^2) dx \right\}^2 + \left\{ \int_0^1 x J_0 \left(\frac{aPR}{F} x \right) \exp \left(-\frac{a^2 x^2}{1+\xi_0^2} \right) \cos(s_1 x^2) dx \right\}^2 \right] \quad (3)$$

で与えられる。ただし

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{kws^2}{f}, & a &= \frac{a}{ws}, & F &= \frac{Z}{f}, \\ R &= \frac{\rho}{ws}, & s_1 &= \frac{Pa^2(1-F)}{2F} + \frac{a^2 \xi_0^2}{1+\xi_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

また ξ_0 は (2) で定義された ξ の開口上での値を表す。数値計算は式 (3) を用いて中心軸上分布および横軸分布を求める。軸上分布よりその最大点 Z_m は容易に求まり、また横軸分布より、界強度が中心軸上の $1/e$ になる点までの距離が最小になる点 Z_s' が求まる。この計算結果を図 1 に示す。図 1 において Z_0 は焦点距

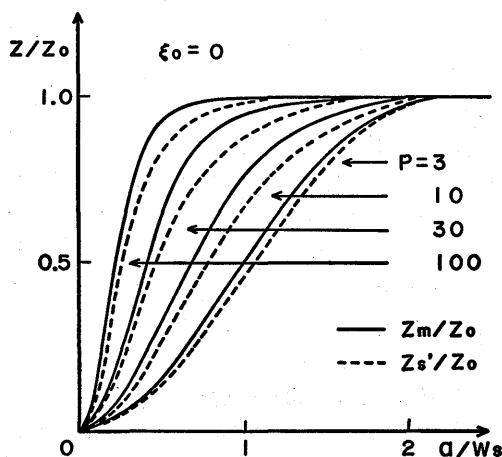


Fig. 1. The positions of the most focused point by a finite aperture lens. The solid and the dotted lines represent the points of the maximum axial intensity and the minimum spread, respectively.

離 f の無限開口レンズにより変換をうけたビーム波の最も絞られた位置すなわちビームウェストの位置を示している。図 1 より、界が最も絞られた位置の定義として前述の Z_m と Z_s' のいずれをとるかによって若干その差が出てくること、およびいずれの場合も、無限開口レンズによる焦点の位置より開口に近い方に移動することがわかる。実験ではこの二つの定義にしたがった焦点の位置を求め計算と比較検討する。

3. 実験および検討

本実験では発振波を 6328 オングストロームの H_e-N_e レーザの基本モードを用いて、焦点距離が各々 50 cm および 30 cm のレンズに対して行なった。有限開口レンズとしてこれらレンズの直後に金属薄板に微小孔をあけたものを用いた。これを入射ビームの伝搬軸と開口中心が一致するように設置する。回折界の測定はフォトダイオードの表面を細孔をあけたアルミ箔で覆い、これを伝搬軸方向およびそれと垂直な方向に微動ができる台上に置き、それをオプティカルベンチ上にのせて行なった。開口の位置では入射ビームは凸の等位相面をもっており、したがってこの状態ではビーム波の位相分布と振幅分布の特性が同時に回折界のふるまいに影響をおよぼす。以上の方法により行なった結果を図 2(a)~(b) に示す。図 2 より、伝搬軸上で最大強度をとる位置にくらべて、横軸方向の広がりがある最小の位置の測定の方が誤差が大きく現われていることがわかる。これは伝搬軸強度最大点が界の大きな部分での測定であるのに対して、横軸分布最小の位置を求めるためには界強度がかなり小さい部分まで測定しなければならず、誤差の入ってくる可能性が大きいことが最大の原因と思われる。また軸上強度の判定において、開口中心が伝搬軸と一致していない場合でも最大強度の位置が大きくずれることはないのに対して、横軸分布は左右対称性がくずれ、したがって横軸分布の広がり幅を一義的に決められず、平均値を取る操作が必要になり、これも誤差を大きくする要因の一つになっている。この左右対称性については計算を求める場合、開口の形状、その中心と伝搬軸の一致、およびレーザ発振モードの界分布などがすべて理想的状態にあるとしている。実際にこれらを調べてみると、開口は完全な円形からずれている。レーザの発振モードも完全な単一基本モードではなく、若干ではあるが、左右対称性がくずれている。これらのことを考慮に入れると、軸合わせを正確に行なったとしても、回折界に対称性を期待することはできず、この影響は前述のように横軸分布を測定する際により大きな

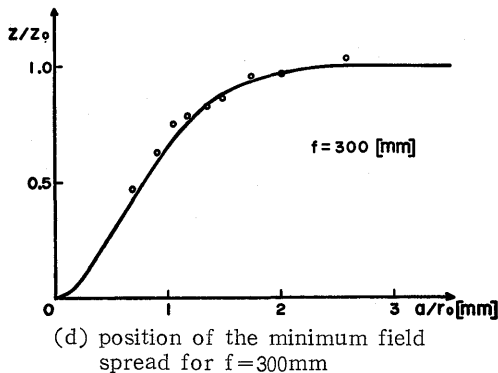
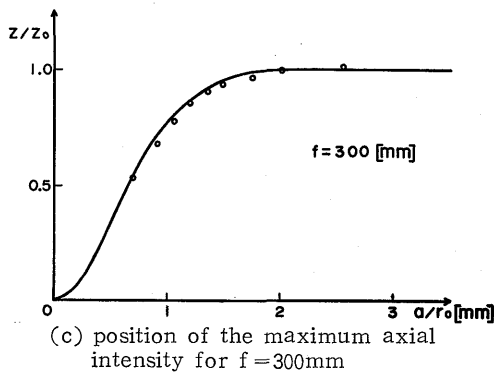
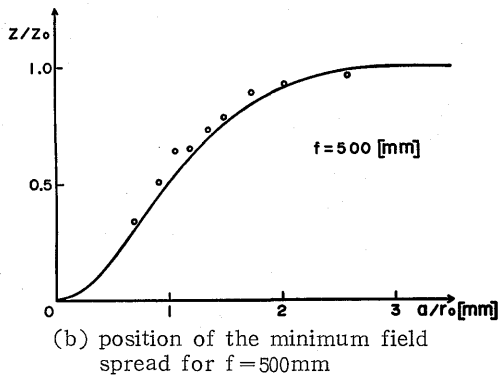
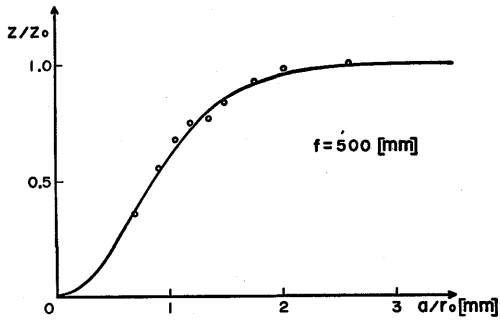


Fig.2. Experimental results of the positions of the most focused point by a finite aperture lens. The solid lines represent theoretical results.

誤差の要因となる。横軸分布は界強度がかなり小さくなる領域まで測定する必要があるが、検出器の受光面を小さくして各点の測定を試みると感度が問題となり、ある程度以下の受光面積にすることはできない。その結果、得られた値は受光面積内の平均値となり、これも計算値と違う要因の一つかと思われる。今後はこれらの装置自体による誤差を少なくするとともに、実験方法にも工夫すべき点があり、検討課題である。

4. むすび

有限開口レンズによるレーザビーム絞りの効果を理論的・実験的に調べた。最も界が絞られた位置は無限大レンズの場合と異なり、一義的に定義することはできないが、伝搬軸上の界強度最大点が、横方向の広がり最小の位置よりつねにレンズに対し遠方にくること、本実験の範囲内ではレンズ開口がその位置でのビームのスポットサイズの二倍程度になるとほとんど、無限開口レンズとみなしてよいことなどが確かめられた。入射条件をもっとかえて、等位相面の曲率が極端に大きい場合、あるいはレンズの焦点距離をもっと小さいときなどの検討は今後の問題である。また装置の改良、正確な形状をもった開口の作製、より高感度の検出器なども課題となる。

参 考 文 献

- 1) Marcuse, D.; Light Transmission Optics, Van Nostrand Reinhold, New York (1972)
- 2) Saga N., Tanaka K., and Fukumitsu O.; Appl. Opt., **20**, pp.2827—2831 (Aug., 1981)
- 2) 羽伐, 佐賀, 田中, 昭和58年度電気関係学会九州支部連合大会, 525
- 4) 羽伐, 佐賀, 田中, 昭和59年度電子通信学会総合全国大会, 1215
- 5) Virendra N. Mahajan; Appl. Opt., **22**, 19, pp. 3042—3053 (Oct., 1983)

